



高等教育本科国家级规划教材

电子技术

电工学Ⅱ（第三版）

史仪凯 主编



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 子 技 术

(电工学Ⅱ)(第三版)

史仪凯 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本套电工学教材是依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会 2011 年新修订的“电工学课程教学基本要求”,在第二版的基础上精选、改写、补充、修订而成。全套教材分《电工技术(电工学 I)》、《电子技术(电工学 II)》和《电工电子应用技术(电工学 III)》三册编写。配合文字教材相继出版电子教案、网络课程、作业集和学习指导等立体化配套教材。本套书可作为高等学校工科非电类专业本科和专科“电工学”课程的教材,也可供科技人员阅读。

本套教材第一版 2005 年获国家级教学成果二等奖,是 2007 年国家级精品课程主干教材;第二版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,其中《电工电子应用技术(电工学 III)》2009 年被评为普通高等教育国家级精品教材;2012 年被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术. 电工学. 2/史仪凯主编. —3 版. —北京:科学出版社,2016. 6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-044578-0

I. ①电… II. ①史… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124249 号

责任编辑:余 江 张丽花/ 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东/ 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2008 年 8 月第 二 版 印张:21

2016 年 6 月第 三 版 字数:423 000

2017 年 12 月第八次印刷

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

主 编 简 介



史仪凯 西北工业大学机电学院教授、博士生导师、国家级教学名师。现任西北工业大学国家级“电工学精品课程”和国家级“电工学课程教学团队”负责人。兼任中国高等学校电工学研究会副理事长。

长期从事电工学、机械电子工程、电气工程教学和科研工作。主讲本科生和研究生课程 10 余门。先后主持国家自然科学基金、省部级基金课题 10 余项,国家和省部级教学研究课题 10 余项。已培养博士、硕士研究生 90 多人。主编(著、译)出版教材和著作 20 余部。在国内外学术刊物和国际会议发表论文 300 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 收录 100 余篇,申请授权和受理国家发明专利 20 余项。先后获国家级教学成果二等奖 1 项、省部级教学成果和科技奖 10 余项、宝钢优秀教师奖 1 项。

联系地址:西安市友谊西路 127 号 西北工业大学 403 信箱

邮编:710072

电话:029-88494893

传真:029-88494893

E-mail:ykshi@nwpu.edu.cn

第三版前言

本套教材是依据教育部高等学校教学指导委员会新修订的“电工学”课程教学基本要求,课程的特点、作用和任务,以及编者多年从事电工学课程教学和教改的经验体会,在第二版的基础上不断总结提高和完善修订而成。为使电工学(多学时)教材更加符合学生的认知规律和教学要求,将电工学分《电工技术》(电工学Ⅰ)、《电子技术》(电工学Ⅱ)和《电工电子应用技术》(电工学Ⅲ)三册编写。

本套教材自2005年第一版出版以来,为适应科学技术快速发展和教学改革的需要,对结构体系和内容不断总结提高和完善修订,2006年被遴选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。2012年又被遴选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本次新修订指导原则是:强化基础性,精选课程的基础内容,叙述上既要简明扼要,又要符合学生认识规律,使学生通过基础内容的学习掌握基本理论、知识和技能,不断提高自学能力和创新意识,为后续课程的学习和今后从事工程技术工作打好电工电子技术的理论基础;突出应用性,电工电子技术是一门实践性和应用性很强的技术基础课,教材不仅涉及知识面广,而且有着广阔的工程背景,化解难教、难学的被动教学局面,关键在于突出“应用”,使学生“学懂”和“会用”,教材内容的安排上力求与工程实践紧密结合,通过教学使学生掌握所学知识的具体应用,提高学生分析和解决问题的能力;体现先进性,随着电工电子技术的快速发展,新知识、新技术和新器件不断涌现,教材内容必须不断更新,力求在结构体系上与教学要求相吻合,内容阐述上要体现一个“新”字,以新理论、新方法和新内容激励学生的学习兴趣,提高学生的科学思维 and 创新能力。

本套教材(第三版)主要进行了以下修订。

(1) 优化了部分章节的结构体系,如除了将涉及电工技术和电子技术的“继电器控制”“可程序控制器及其应用”“电气电测技术”等内容,从《电工技术》教材中调整至《电工电子应用技术》教材中介绍,还将整流、滤波和稳压电路安排在二极管应用中介绍;将“集成串联型稳压电路”与“开关型稳压电源”内容一并安排在“集成运算放大器的应用”中介绍;将“电压源与电流源及其等效变换”和“受控源”内容安排在“电路的基本概念与基本定律”中介绍等。

(2) 改写了“半导体三极管与基本放大电路”“集成运算放大器的应用”“门电

路与组合逻辑电路”“触发器与时序逻辑电路”“交流电动机”“直流电动机”“电气自动控制技术”“可编程控制器原理与应用”等部分章节内容,如“双稳态触发器”一节中在介绍基本 RS 触发器的逻辑功能后,其他触发器不再介绍具体翻转情况,直接给出逻辑功能、状态表、逻辑符合和时序图。

(3) 新增了反映电工技术和电子技术发展的新技术、新理论、新产品,如 R 铁心变压器、超声波电动机、液晶显示器及驱动电路、电动机的变频调速、非电量检测中的信号处理电路、开关型稳压电源电路等信息、通信、控制方面的相关内容。

(4) 删去了部分章节中的内容,如“集成运算放大器的应用”中的“信号测量电路”和“精密整流电路”;“电气自动控制技术”中的“继电器控制电路的逻辑函数式”等内容,以及教材中的“模拟试题”和“试题解答”。

(5) 修改、补充了部分章节的例题、“练习与思考”和“习题”。

(6) 书中带标号“*”的章节属于加深、拓宽内容,教师可根据专业特点和学时取舍。

在普通高等教育“十一五”国家级规划教材(电工学立体化教材(第二版))项目的支持下,完成与本套教材配套的立体化教材有:

- (1) 《电工学(I、II、III)(第二版)学习指导》,史仪凯主编;
- (2) 《电工技术网络课程》,史仪凯、袁小庆主编;
- (3) 《电子技术网络课程》,史仪凯、袁小庆主编;
- (4) 《电工电子应用技术网络课程》,李志宇、赵敏玲主编;
- (5) 《电工电子技术》,史仪凯主编;
- (6) 《电工电子技术学习指导》,袁小庆主编;
- (7) 《电工技术(第二版)》电子教案,史仪凯主编;
- (8) 《电子技术(第二版)》电子教案,向平主编;
- (9) 《电工电子应用技术(第二版)》电子教案,赵妮主编;
- (10) 《电工电子技术》电子教案,袁小庆主编;
- (11) 电工学四部文字教材配套作业集。

本书由西北工业大学史仪凯主编和统稿,向平担任副主编。其中第 1 章、第 2 章、第 5 章由史仪凯编写,并对部分章节进行改写;第 3 章由王引卫编写;第 4 章由刘雁编写;第 6 章由向平编写;第 7 章由王文东编写;第 8 章和部分习题答案由袁小庆编写;第 9 章由李俊华编写。

西安交通大学马西奎教授和西北工业大学张家喜教授对本书进行了审阅,并提出了宝贵意见和修改建议;本书前两版还得到了许多读者的关怀,他们提出了许

多建设性意见;尤其是得到了教育部、科学出版社、西北工业大学的支持和关心。在此作者一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者提出宝贵的批评意见。

史仪凯

2015年5月于西北工业大学

目 录

第 1 章 半导体二极管与整流电路	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体与掺杂半导体	1
1.1.2 PN 结	3
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 基本结构	4
1.2.2 伏安特性	5
1.2.3 主要参数	6
1.3 半导体二极管的应用	7
1.3.1 限幅电路	7
1.3.2 检波电路	8
1.3.3 二极管“续流”保护电路	8
1.3.4 二极管与门电路	9
1.4 二极管整流电路	9
1.4.1 单相半波整流电路	10
1.4.2 单相桥式整流电路	11
1.4.3 三相桥式整流电路	13
1.4.4 滤波电路	15
1.5 稳压二极管及其应用	18
1.5.1 稳压二极管特性与参数	19
1.5.2 稳压二极管稳压电路	20
1.6 光敏二极管	21
1.7 发光二极管	22
本章小结	23
习题	24
第 2 章 半导体三极管与基本放大电路	28
2.1 晶体三极管	28
2.1.1 基本结构	28
2.1.2 放大作用	29
2.1.3 特性曲线	32
2.1.4 主要参数	34

2.1.5 复合晶体管	36
2.2 场效应晶体管	37
2.2.1 基本结构	37
2.2.2 工作原理	39
2.2.3 特性曲线	40
2.2.4 主要参数	41
* 2.3 光敏三极管与光电耦合管	42
2.3.1 光敏三极管	42
2.3.2 光电耦合管	42
2.4 电压放大电路	44
2.4.1 放大电路的基本组成	44
2.4.2 放大电路工作情况分析	45
2.4.3 放大电路静态工作点稳定分析	54
2.5 射极输出器	58
2.5.1 射极输出器工作情况分析	58
2.5.2 射极输出器的应用	60
2.6 场效应管放大电路	62
2.6.1 静态分析	63
2.6.2 动态分析	64
2.7 多级放大电路	66
2.7.1 放大电路级间耦合	66
2.7.2 多级放大电路分析	67
* 2.7.3 放大电路频率特性	69
2.8 差动放大电路	72
2.8.1 差动放大电路基本原理	72
2.8.2 差动放大电路工作情况分析	76
2.8.3 差动放大电路输入和输出方式	78
2.8.4 差动放大电路共模抑制比	78
2.9 功率放大电路	79
2.9.1 功率放大电路基本要求	79
2.9.2 功率放大电路工作状态	80
2.9.3 互补对称功率放大电路	81
2.9.4 集成功率放大电路	86
本章小结	87
习题	88
第3章 集成运算放大器简介	94

3.1 集成运算放大器的基本概念	94
3.1.1 组成原理	95
3.1.2 主要参数	97
3.1.3 传输特性	98
3.2 集成运算放大电路中的反馈	101
3.2.1 反馈基本概念	101
3.2.2 反馈类型和判断	103
3.2.3 具体负反馈电路分析	105
3.2.4 负反馈对放大电路性能影响	110
3.3 运算放大器使用时应注意的问题	113
3.3.1 选件	113
3.3.2 调零	114
3.3.3 消振	115
3.3.4 保护	115
本章小结	117
习题	117
第4章 集成运算放大器的应用	120
4.1 信号运算电路	120
4.1.1 比例运算电路	120
4.1.2 加法和减法运算电路	122
4.1.3 积分和微分运算电路	124
4.2 信号处理电路	127
4.2.1 RC有源滤波电路	127
4.2.2 电压比较电路	131
4.2.3 两种转换电路	134
* 4.3 信号产生电路	136
4.3.1 矩形波发生电路	136
4.3.2 三角波发生电路	137
4.3.3 锯齿波发生电路	138
4.4 集成串联型稳压电路	139
4.4.1 运算放大器组成的串联型稳压电路	140
4.4.2 三端稳压电路	141
* 4.4.3 开关型稳压电路	143
本章小结	146
习题	147
第5章 正弦波振荡电路	153

5.1 正弦振荡电路的基本原理	153
5.1.1 自激振荡条件	153
5.1.2 自激振荡的建立与稳定	154
5.1.3 正弦振荡电路组成	155
5.2 RC 正弦振荡电路	155
5.2.1 RC 串并联电路选频特性	155
5.2.2 RC 桥式振荡电路	156
5.3 LC 正弦振荡电路	157
5.3.1 变压器反馈式	157
5.3.2 电容反馈式	159
5.3.3 电感反馈式	160
5.4 石英晶体正弦振荡电路	161
5.4.1 基本结构	161
5.4.2 等效电路	162
5.4.3 应用举例	163
本章小结	164
习题	164
第6章 门电路与组合逻辑电路	168
6.1 数字电路概述	168
6.1.1 模拟量和数字量	168
6.1.2 数字电路举例	168
6.1.3 脉冲信号	170
6.2 数字电路中数的表示方法	171
6.2.1 计数制	171
6.2.2 二进制与十进制的相互转换	173
6.2.3 二-十进制	174
6.3 晶体管开关作用	174
6.4 逻辑门电路	177
6.4.1 基本逻辑门电路	177
6.4.2 TTL 门电路	181
6.4.3 CMOS 门电路	185
6.5 组合逻辑电路的分析与综合	186
6.5.1 逻辑代数的基本运算法则与定理	187
6.5.2 逻辑式的简化	188
6.5.3 逻辑门电路组合应用	192
6.6 数字集成组合逻辑电路	194

6.6.1	加法器	194
6.6.2	编码器	196
6.6.3	译码器与数码显示	200
6.6.4	数据选择器	209
* 6.6.5	数值比较器	211
本章小结		213
习题		214
第7章 触发器与时序逻辑电路		218
7.1	双稳态触发器	218
7.1.1	RS 触发器	218
7.1.2	JK 触发器	222
7.1.3	D 触发器	224
7.1.4	触发器逻辑功能的转换	225
7.2	寄存器	226
7.2.1	数码寄存器	226
7.2.2	移位寄存器	227
7.2.3	集成寄存器	231
7.3	计数器	234
7.3.1	二进制计数器	234
7.3.2	十进制计数器	238
7.3.3	任意进制计数器	242
7.3.4	集成计数器	243
7.4	单稳态触发器	250
7.4.1	CMOS 积分型单稳态触发器	251
7.4.2	集成单稳态触发器	252
7.5	无稳态触发器	253
7.6	555 定时器与应用	254
7.6.1	555 定时器	254
7.6.2	由 555 定时器构成的单稳态触发器	256
7.6.3	由 555 定时器构成的多谐振荡器	258
* 7.7	应用举例	259
7.7.1	抢答电路	259
7.7.2	8 路彩灯控制器	261
7.7.3	数字电子钟	262
本章小结		263
习题		264

第 8 章 半导体存储器与可编程逻辑器件	269
8.1 只读存储器	269
8.1.1 ROM 结构	269
8.1.2 ROM 工作原理	270
8.2 随机存取存储器	273
8.2.1 RAM 结构	273
8.2.2 RAM 工作原理	274
8.2.3 2114 型静态 RAM 及其扩展	274
8.3 可编程逻辑器件	276
8.3.1 可编程只读存储器	277
8.3.2 可编程逻辑阵列	281
8.3.3 可编程阵列逻辑器件	284
8.3.4 通用阵列逻辑	285
本章小结	285
习题	286
第 9 章 模拟量与数字量的转换	288
9.1 数/模转换器	288
9.1.1 T 形电阻网络 DAC	289
9.1.2 倒 T 形电阻网络 DAC	291
9.1.3 集成电路 DAC	293
9.1.4 主要参数	293
9.2 模/数转换器	295
9.2.1 逐次逼近 ADC	295
9.2.2 双积分式 ADC	298
9.2.3 集成电路 ADC	300
9.2.4 主要参数	302
本章小结	302
习题	303
部分习题答案	304
中英文名词对照	314
参考文献	319

第 1 章 半导体二极管与整流电路

半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、耗电少等特点,是组成各种电子电路的核心器件,在当今的电子技术中占有主导地位。因此,了解半导体器件是学习电子技术的基础。

本章首先简要介绍半导体的基础知识;其次讨论二极管和稳压管的基本结构、工作原理、特性曲线、主要参数及简单应用。重点讨论二极管整流电路、滤波电路和稳压电路。

1.1 半导体的基础知识

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。常用的半导体材料主要有硅、锗、硒、砷化镓和一些氧化物等。下面以硅为例讨论半导体的导电特性。

1.1.1 本征半导体与掺杂半导体

硅和锗都属于四价元素,其原子的最外层轨道上有 4 个价电子,如图 1.1.1 所示。纯净的硅和锗呈晶体结构,原子排列整齐,且每个原子的 4 个价电子与相邻的 4 个原子所共有,构成共价键结构,如图 1.1.2 所示。当温度为绝对零度时,硅晶体不呈现导电性。当温度升高时,由于热激发,一些电子获得一定能量后会挣脱束缚成为自由电子。与此同时,在这些自由电子原有的位置上就留下相对应的空位置,称为空穴。空穴因失去一个电子而带正电,如图 1.1.3 所示。由于正负电相互吸引,空穴附近的电子会填补这个空位置,于是又产生新的空穴,又会有相邻的电

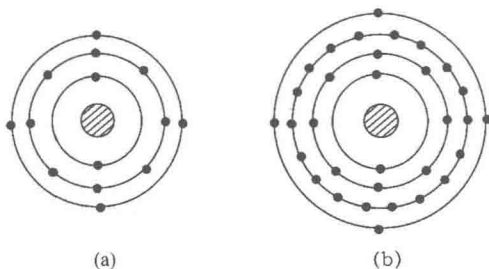


图 1.1.1 硅和锗的原子结构图
(a) 硅;(b) 锗

子来递补。如此继续下去,就好像空穴在运动,这就是所谓的空穴运动。由热激发而产生的自由电子和空穴总是成对出现的。

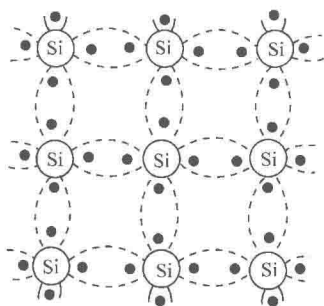


图 1.1.2 硅原子间的共价键结构

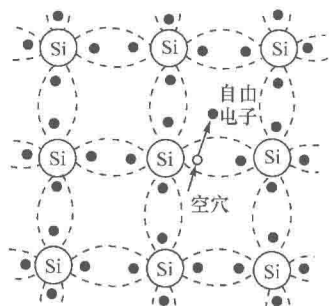


图 1.1.3 空穴和自由电子的形成

自由电子和空穴统称为载流子。

半导体材料在外加电场的作用下,自由电子和空穴按相反方向运动,构成的电流方向一致,所以半导体中的电流是电子流和空穴流之和。这是半导体和金属在导电原理上的本质区别。

半导体器件之所以在现代科学技术中得到如此广泛的应用,是由于其导电性能易受外界条件变化的影响,主要表现如下。

1. 热敏性

环境温度对半导体的导电能力影响很大。随着温度的升高,纯净半导体的导电能力显著增强。因而,可用半导体材料制成各种温度敏感元件,如热敏电阻等。

2. 光敏性

光照对某些半导体材料的导电能力影响很大。一些半导体材料受到光照时,载流子会剧增,导电能力也随之增强。利用这种特性可制成各种光敏器件,如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光控晶闸管等。

3. 掺杂性

纯净的半导体中自由电子和空穴总是成对出现的,在常温下其数量有限,导电能力并不强,如果在纯净的半导体中掺入某些微量杂质(其他元素),其导电能力将会大大增强。

若在纯净的半导体硅或锗中掺入三价硼、铝等微量元素,由于这些元素的原子最外层有三个价电子,故在构成的共价键结构中由于缺少价电子而形成空穴。这些掺杂后的半导体的导电作用主要靠空穴运动,其中空穴是多数载流子,而热激发形成

的自由电子是少数载流子。因此,称这种半导体为空穴半导体或P型半导体。

若在纯净的半导体硅或锗中掺入五价磷、砷等微量元素,由于这些元素的原子最外层有五个价电子,故在构成的共价键结构中由于存在多余的价电子而产生大量自由电子。这种半导体主要靠自由电子导电,其中自由电子是多数载流子,热激发形成的空穴是少数载流子。因此,称这种半导体为电子半导体或N型半导体。

需要指出的是,不论P型半导体还是N型半导体,虽然都有一种载流子占多数,但半导体都是中性的,对外不显电性。

1.1.2 PN结

采用适当工艺把P型半导体和N型半导体紧密连接后做在同一基片上,在两种半导体之间形成一个交界面。由于两种半导体中载流子浓度的差异,将产生载流子的相对扩散运动。若P区的空穴浓度大于N区,P区的空穴要穿过交界面向N区扩散;同样,若N区的自由电子浓度大于P区,N区的自由电子也要向P区扩散。扩散的结果是在交界面的P区侧留下带负电的离子,N区侧留下带正电的离子。这些不能移动的带电离子在交界面两侧形成了一个空间电荷区,产生一个由N区指向P区的电场,称为内电场,如图1.1.4所示。内电场一方面阻止多数载流子的继续扩散,即对P区的空穴、N区的自由电子的继续扩散起阻挡作用;另一方面内电场又促进少数载流子的运动,即促进P区的自由电子、N区空穴的运动。这种少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移。显然,多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动方向相反。

在空间电荷区开始形成时,扩散运动占优势,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐渐加强。内电场的加强又使得漂移运动加强,扩散运动减弱,最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,在P区和N区的交界面上形成一个宽度稳定的空间电荷区——PN结。在PN结内,大都是不能移动的正负离子,自由电子和空穴大都复合,载流子极少,所以电阻率极高,又称为耗尽层。

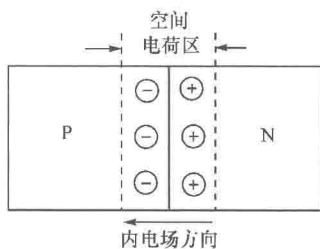


图 1.1.4 PN结的形成

实际工作中,PN结上总有外加电压,称为偏置。

若将P区接电源正极,N区接电源负极,称为正向偏置,简称正偏,如图1.1.5(a)所示。由图可见,外电场与内电场方向相反,空间电荷区变薄,多数载流子的扩散运动加强,形成较大的正向电流,电流方向从P区到N区。在一定范围内,外加电场越强,正向电流越大,此时PN结呈低阻导通状态。

若将P区接电源负极,N区接电源正极,称为反向偏置,简称反偏,如图1.1.5(b)所示。由图可见,外电场和内电场方向一致,空间电荷区变宽,多数载流子的扩

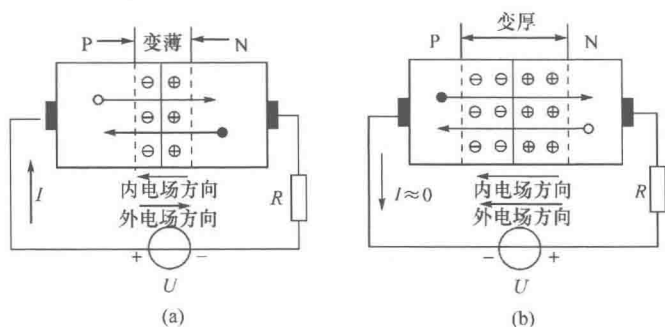


图 1.1.5 PN 结的单向导电性

(a) PN 结正偏; (b) PN 结反偏

散运动难于进行。少数载流子的漂移运动虽然加强,但由于少数载流子的浓度较低,形成的反向电流很小,电流方向由 N 区到 P 区。可见,PN 结呈反向高阻状态。

综上所述,PN 结具有单向导电性。正偏时,PN 结的电阻很小,正向电流大,PN 结导通;反偏时,PN 结的电阻很大,反向电流很小,PN 结截止。

练习与思考

1.1.1 在半导体中,空穴的移动实质上是电子的移动。那么,它和自由电子的移动有何区别?

1.1.2 将一个 PN 结连成如图 1.1.6 所示。说明三种情况下,电流表的读数有什么不同?为什么?

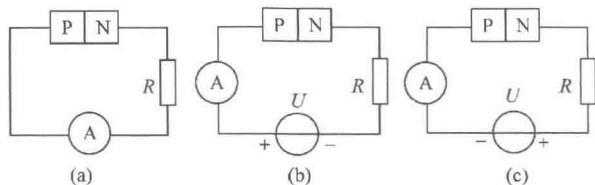


图 1.1.6 练习与思考 1.1.2 图

1.2 半导体二极管

1.2.1 基本结构

将一个 PN 结连上电极引线,再封装到管壳中就构成半导体二极管。图 1.2.1 是常见半导体二极管的外形。由图 1.2.1 可见,二极管有两个电极,一为正极(又称为阳极),从 P 区引出;一为负极(又称为阴极),从 N 区引出。图 1.2.2